

О СИНУС-ФИЛЬТРЕ ДЛЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Эффективным средством энергосбережения в электроприводе турбомеханизмов с электродвигателями переменного тока является использование частотного регулирования скорости вращения и, как следствие, производительности. Современные технологии частотного регулирования подразумевают питание нагрузки напряжением несинусоидальной формы из отдельных квази-прямоугольных импульсов. С целью сглаживания фронтов импульсов широтно-импульсно модулированного (ШИМ) напряжения, подаваемого на клеммы асинхронных двигателей (АД) от преобразователей частоты (ПЧ) используются выходные фильтры между ПЧ и АД. Негативное влияние ШИМ-напряжения на электрооборудование при отсутствии выходного фильтра выражается в следующем: высокочастотный шум АД; возрастание уровня электромагнитных помех; электрокоррозия и разрушение подшипников АД и приводимых механизмов; постепенная деградация электрической изоляции, сопровождаемая интенсивным образованием озона, что вредно для обслуживающего персонала.

Одним из путей решения проблемы является использование синус-фильтра (СФ). Он выполняет максимальное приближение формы выходного напряжения ПЧ к синусоиду, тем самым минимизируя значение суммарного коэффициента гармонических составляющих междофазного напряжения k_U . Это позволяет использовать совместно с ПЧ неспециализированные, рассчитанные на сетевое питание недорогие АД. Общий принцип расчета параметров СФ заключается в том, что резонансная частота f_p должна быть гораздо выше частоты основной гармоники напряжения, формируемой автономным инвертором напряжения в составе ПЧ для питания АД. Одновременно f_p должна быть гораздо ниже частоты переключений инвертора или несущей частоты ШИМ $f_{\text{ШИМ}}$. Для надежного выполнения функции сглаживания напряжения для СФ рекомендуется из анализа параметров зарубежных образцов

$$f_{\text{ШИМ}} > (1,5 \dots 2,0) f_p. \quad (1)$$

Например, у СФ на $f_{\text{ШИМ}} = 2 \dots 3$ кГц производства *Danfoss* $f_{\text{ШИМ}} = (3 \dots 4) f_p$. Требуется обеспечить, чтобы падение напряжения основной частоты f_1 на продольной ветви СФ, не было чрезмерно большим, позволяло бы нагрузке работать в допустимом диапазоне отклонения напряжения. Рационально ограничить падение напряжения на f_1 в продольной ветви СФ величиной не более 10 %, а если возможно, то не более 5 %.

При расчете СФ конденсатор выбирается из условия компенсации всей реактивной мощности нагрузки на основной частоте $f_1 = 50$ Гц. Для случая соединения конденсаторов по схеме «звезда» емкость фазы СФ

$$C = \frac{S}{3} \cdot \frac{1}{2\pi f_1 U_1^2} \sqrt{1 - (\cos \varphi)^2}, \quad (2)$$

где S – суммарная мощность нагрузки, подключенной после СФ;

$\cos \varphi$ – коэффициент мощности нагрузки;

U_1 – действующее значение первой гармоники напряжения на емкости СФ.

По f_p , выбираемой из условия (1), и C , которая здесь берется для случая соединения конденсаторов по схеме «звезда», рассчитывается L :

$$L \geq \frac{1}{C} \left(\frac{1}{2\pi f_p} \right)^2. \quad (3)$$

Конкретные пояснения приведены на примере электропривода насоса 14Д6 водонасосной станции на базе четырехполюсного АД с номинальным линейным напряжением 6 кВ и номинальной мощностью на валу $P_{2H} = 630$ кВт. При номинальном режиме работы насоса нагрузка АД составляет $0,73P_{2H}$. Питание АД осуществляется по двухтрансформаторной схеме (рис. 1) от ПЧ «Веспер EI-7009-1000H», имеющего диапазон несущих частот ШИМ $f_{\text{ШИМ}} = 1...2,5$ кГц и наибольший допустимый действующий выходной ток фазы в длительном режиме $I_{\text{предел}} = 1600$ А. Индуктивная ветвь СФ в каждой фазе представлена парой параллельно соединенных токоограничивающих реакторов РТСТ-820-0,0505 УЗ. Активное сопротивление одного реактора составляет $r_L = 1,65$ мОм. Согласно рис. 1, в линиях питания емкостной части СФ могут быть включены демпфирующие резисторы r_C с номиналом 0,013468 Ом.

В СФ не следует использовать емкость большую, чем требуется для обеспечения полной компенсации реактивной мощности нагрузки (в конкретном случае рассчитана 2564 мкФ). Нарушение этого правила ведет к неоправданному увеличению выходного тока ПЧ и тока через емкости СФ (рис. 2).

Конденсаторы СФ наиболее нагружены током в режиме холостого хода. СФ должен обеспечивать возможность работы в длительном режиме при реальном холостом ходе нагрузки, например, АД, во всем диапазоне значений выходного напряжения и частоты ПЧ. Это важно для проведения пусконаладочных работ.

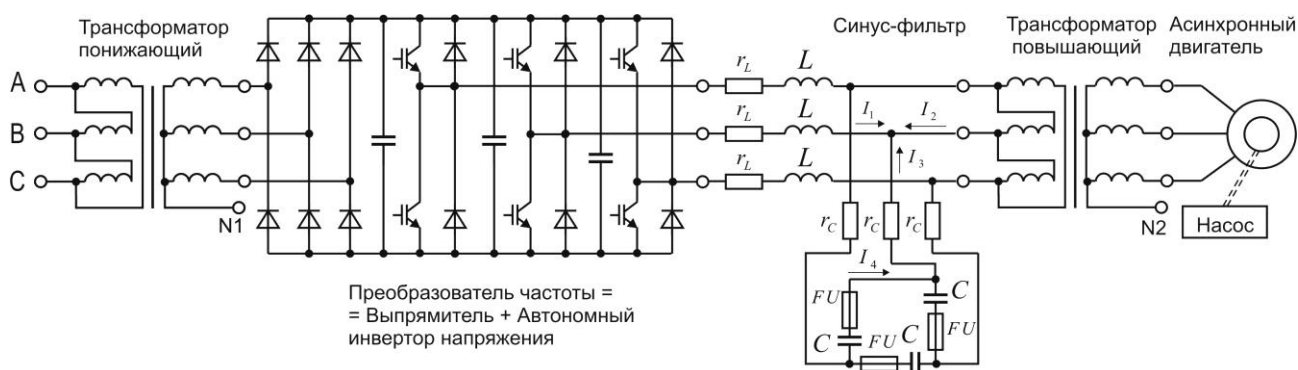


Рис. 1. Двухтрансформаторная схема питания высоковольтного АД от ПЧ

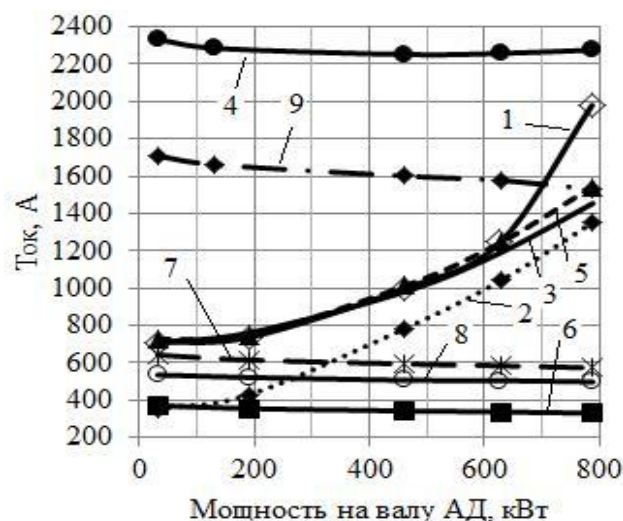


Рис. 2. Расчетные токи СФ: 1 – $I_1 = I_2$ без емкостей при $f_{\text{ШИМ}} = 2,5$ кГц;

2 – I_1 при емкости СФ 2200 мкФ на фазу, $f_{\text{ШИМ}} = 2,5$ кГц; 3 – I_1 при 2200 мкФ,

$f_{\text{ШИМ}} = 1$ кГц; 4 – I_1 при 8360 мкФ, $f_{\text{ШИМ}} = 2,5$ кГц и отсутствии r_C ;

5 – I_2 при 2200 мкФ, $f_{\text{ШИМ}} = 2,5$ кГц (кривые I_2 для остальных случаев весьма близки

показанной); 6 – I_4 при 2200 мкФ, $f_{\text{ШИМ}} = 2,5$ кГц; 7 – I_3 при 2200 мкФ, $f_{\text{ШИМ}} = 2,5$ кГц;

8 – I_4 при 2200 мкФ, $f_{\text{ШИМ}} = 1$ кГц; 9 – I_4 при 8360 мкФ, $f_{\text{ШИМ}} = 2,5$ кГц и отсутствии r_C

Снижать удельный ток через емкость СФ за счет увеличения сопротивления демпфирующих резисторов нецелесообразно.

Целесообразно, во всяком случае для частоты основной гармоники выходного напряжения ПЧ $f_1 = 50$ Гц, предъявлять требование соответствия выходного напряжения после СФ по k_U сетевому напряжению (не более 12 % согласно ГОСТ Р 54149-2010).

Список использованных источников

1. Горбачев Г. Н., Чаплыгин Е. Е. Промышленная электроника: учеб. для вузов / под ред. В. А. Лабунцова. М.: Энергоатомиздат, 1988. 320 с.
2. ГОСТ Р 51317.3.2–2006 (МЭК 61000-3-2:2005). Эмиссия гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током не более 16 А (в одной фазе).
3. ГОСТ Р 51318.14.1-2006. Совместимость технических средств электромагнитная. Бытовые приборы, электрические инструменты и аналогичные устройства. Радиопомехи промышленные.